

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-236112
(P2002-236112A)

(43) 公開日 平成14年8月23日 (2002.8.23)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-リ-ト (参考)
G 0 1 N 29/08	5 0 1	G 0 1 N 29/08	5 0 1 2 G 0 4 7
29/04	5 0 3	29/04	5 0 3 4 E 0 6 8
29/22	5 0 2	29/22	5 0 2
// B 2 3 K 26/00		B 2 3 K 26/00	E

審査請求 未請求 請求項の数19 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2001-360415 (P2001-360415)
(22) 出願日 平成13年11月27日 (2001.11.27)
(31) 優先権主張番号 0 9 / 7 2 3 2 6 4
(32) 優先日 平成12年11月27日 (2000.11.27)
(33) 優先権主張国 米国 (U S)

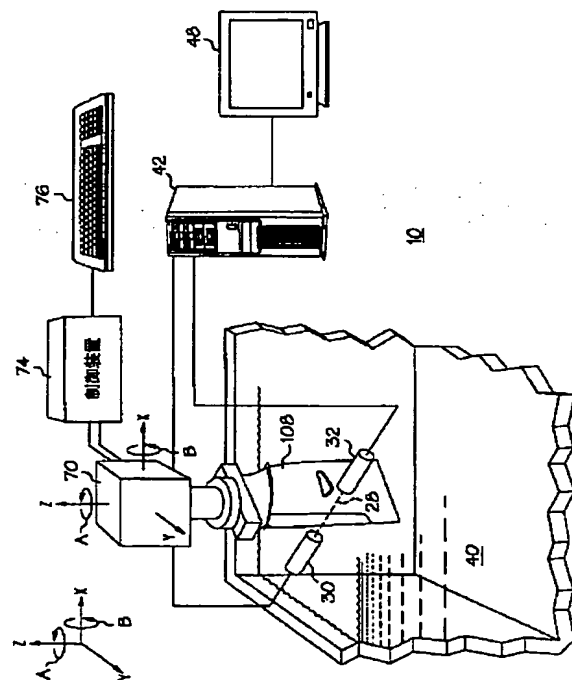
(71) 出願人 390041542
ゼネラル・エレクトリック・カンパニイ
GENERAL ELECTRIC CO
MPANY
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ
クタディ、リバーロード、1番
(72) 発明者 ウィ・ウォン・ソー
アメリカ合衆国、オハイオ州、シンシナテ
ィ、アレンハースト、10910番
(74) 代理人 100093908
弁理士 松本 研一
F ターム (参考) 2G047 AA07 AC05 BA01 BB06 BC00
BC11 GG36 GG37 GG38 GH06
4E068 AH00

(54) 【発明の名称】 超音波分析によるレーザ衝撃ピーニングの品質保証

(57) 【要約】

【課題】 生産用加工物 (108) のレーザ衝撃ピーニング操作の品質管理試験のための方法を提供する。

【解決手段】 (a) レーザ衝撃ピーニング操作によって付与された深部残留圧縮応力を有する領域がレーザ衝撃ピーニング処理表面から加工物 (108) の内部にまで延びているような加工物 (108) 上のレーザ衝撃ピーニング処理表面の少なくとも一部分を超音波で走査する工程と、(b) 走査から得られた信号を計数化し、そして走査から得られた強度値の計数化画像 (44) を形成する工程と、(c) 強度値に基づいて加工物 (108) の計数化画像 (44) の複数の点に関する少なくとも1つの統計関数値を計算する工程と、(d) かかる統計関数値を、レーザ衝撃ピーニング操作の品質保証あるいは加工物 (108) の合格又は不合格に関する合否判定基準と比較する工程とを含む方法である。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 生産用加工物（108）のレーザ衝撃ピーニング操作の品質管理試験のための方法において、

(a) 前記レーザ衝撃ピーニング操作によって付与された深部残留圧縮応力を有する領域がレーザ衝撃ピーニング処理表面から前記加工物（108）の内部にまで延びているような前記加工物（108）上のレーザ衝撃ピーニング処理表面の少なくとも一部分を超音波で走査する工程と、

(b) 前記走査から得られた信号を計数化し、そして前記走査から得られた強度値の計数化画像（44）を形成する工程と、

(c) 前記計数化画像（44）の複数の点に関して強度値を計算し、そして前記強度値に基づいて前記加工物（108）の少なくとも1つの統計関数に関する少なくとも1つの統計関数値を計算する工程と、

(d) 前記統計関数値を、前記レーザ衝撃ピーニング操作の品質保証あるいは前記加工物（108）の合格又は不合格に関する合否判定基準と比較する工程とを含むことを特徴とする方法。

【請求項2】 前記計数化画像（44）の前記複数の点が、前記レーザ衝撃ピーニング処理表面の前記一部分の内部にあるレーザ衝撃ピーニング処理くぼみ（158）に対応した1群の円（80）によって区画される請求項1記載の方法。

【請求項3】 前記走査及び放射物が、送信用及び受信用変換器（30、32）を使用しながら前記加工物（108）の両面に関して実施される超音波通過タイプのものである請求項2記載の方法。

【請求項4】 前記統計関数が前記計数化画像（44）の4つの統計的性質の少なくとも1つから成ると共に、前記4つの統計的性質が4つの式により定義されている、第1の式は平均行列

$$F1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K SDM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2} \right]$$

である請求項4記載の方法。

【請求項7】 前記統計関数が標準偏差ベクトルの平均

$$F3 = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X SDV(x) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X \left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}} \right]$$

である請求項4記載の方法。

【請求項8】 前記計数化画像（44）の前記複数の点が、前記レーザ衝撃ピーニング処理表面の一部分の内部にあるレーザ衝撃ピーニング処理くぼみ（158）を包囲する長方形（84）によって区画されると共に、前記統計関数がソーベル関数

【数8】

【数1】

$$MM(k) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X d_k(x)$$

（式中、dはk番目のくぼみ内のx番目の点に関する強度値であって、それが各々の円内のX個の画素（46）又は点について合計されている）であり、第2の式はくぼみ標準偏差行列

【数2】

$$SDM(k) = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2}$$

であり、第3の式は平均ベクトル

【数3】

$$MV(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_k(x)$$

であり、かつ第4の式は1群の円のそれぞれに関する標準偏差ベクトル

【数4】

$$SDV(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}}$$

である請求項2記載の方法。

【請求項5】 前記統計関数がくぼみ平均行列の平均

【数5】

$$F1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K MM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X d_k(x) \right]$$

である請求項4記載の方法。

【請求項6】 前記統計関数が標準偏差行列の平均

【数6】

$$F2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2} \right]$$

【数7】

$$F3 = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X \left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}} \right]$$

$$F4 = \frac{\sum_i \sum_j (d_{u,v} * w_{u,v})}{N}$$

（式中、wはソーベル演算子であり、関数F4は前記長方形（84）の内部のx及びy方向の点に対応したi及びjについて合計されており、 $d_{u,v}$ は各々の点i、jに関する9つの点u、vにおける強度値であり、かつNはスケーリング因子である）である請求項1記載の方

法。

【請求項9】 前記ソーベル演算子が

【数9】

$$W_{u,v} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & W_{1,3} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & W_{2,3} \\ W_{3,1} & W_{3,2} & W_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

である請求項8記載の方法。

【請求項10】 前記合否判定基準が、試験片の統計関数データと、同一又は同様なレーザ衝撃ピーニング装置においてレーザ衝撃ピーニングを施された試験片の高サイクル疲労試験に基づく高サイクル疲労破損データとの間において予め決定された相関関係に基づいている請求項1記載の方法。

【請求項11】 前記試験片の各々が、同一又は同様なレーザ衝撃ピーニング装置においてレーザ衝撃ピーニングを施された試験片のレーザ衝撃ピーニング処理区域内に破損を促進する傷を有する請求項10記載の方法。

【請求項12】 前記計数化画像(44)の前記複数の点が、前記レーザ衝撃ピーニング処理表面の前記一部分の内部にあるレーザ衝撃ピーニング処理くぼみ(158)に対応した1群の円(80)によって区画される請求項11記載の方法。

【請求項13】 前記走査及び放射物が、送信用及び受信変換器(30、32)を使用しながら前記加工物(108)の両面に関して実施される超音波通過タイプのものである請求項12記載の方法。

【請求項14】 前記統計関数が前記計数化画像(44)の4つの統計的性質の少なくとも1つから成ると共に、前記4つの統計的性質が4つの式により定義されていて、第1の式は平均行列

【数10】

$$F2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K SDM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2} \right]$$

である請求項14記載の方法。

【請求項17】 前記統計関数が標準偏差ベクトルの平

$$F3 = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X SDV(x) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X \left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}} \right]$$

である請求項14記載の方法。

【請求項18】 前記計数化画像(44)の前記複数の点が、前記レーザ衝撃ピーニング処理表面の一部分の内部にあるレーザ衝撃ピーニング処理くぼみ(158)を包囲する長方形(84)によって区画されると共に、前記統計関数がソーベル関数

【数17】

$$MM(k) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X d_k(x)$$

(式中、dはk番目のくぼみ内のx番目の点に関する強度値であって、それが各々の円内のX個の画素又は点について合計されている)であり、第2の式はくぼみ標準偏差行列

【数11】

$$SDM(k) = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2}$$

であり、第3の式は平均ベクトル

【数12】

$$MV(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_k(x)$$

であり、かつ第4の式は1群の円のそれぞれに関する標準偏差ベクトル

【数13】

$$SDV(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}}$$

である請求項12記載の方法。

【請求項15】 前記統計関数がくぼみ平均行列の平均

【数14】

$$F1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K MM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X d_k(x) \right]$$

である請求項14記載の方法。

【請求項16】 前記統計関数が標準偏差行列の平均

【数15】

$$F2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K SDM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2} \right]$$

均

【数16】

$$F3 = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X SDV(x) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X \left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}} \right]$$

$$F4 = \frac{\sum_i \sum_j (d_{i,j} * w_{i,j})}{N}$$

(式中、wはソーベル演算子であり、関数F4は前記長方形(84)の内部のx及びy方向の点に対応したi及びjについて合計されており、 $d_{u,v}$ は各々の点i、jに関する9つの点u、vにおける強度値であり、かつNはスケーリング因子である)である請求項11記載の方法。

【請求項19】 前記ソーベル演算子が

【数18】

$$W_{u,v} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & W_{1,3} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & W_{2,3} \\ W_{3,1} & W_{3,2} & W_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

である請求項18記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の分野】本発明は、レーザ衝撃ピーニングの品質保証のために使用される品質保証方法に関するものである。更に詳しく言えば本発明は、生産用レーザ衝撃ピーニング操作の品質保証のため、レーザ衝撃ピーニング処理表面の超音波試験及び統計分析のための品質保証方法に関する。

【0002】

【背景技術の説明】レーザ衝撃ピーニング（又は「レーザ衝撃加工」とも呼ばれる）は、加工物の表面区域にレーザ衝撃ピーニングを施すことによって付与された深部残留圧縮応力を有する領域を生み出すための方法である。通常のレーザ衝撃ピーニングは、「材料特性の変更」と称する米国特許第3850698号、「レーザ衝撃加工」と称する米国特許第4401477号、及び「材料特性」と称する米国特許第5131957号の明細書中に開示された方法と同じく、高出力パルスレーザからの複数の放射パルスを用いて加工物の表面に衝撃波を生み出すものである。当業界において理解されかつ本明細書中において使用される意味での「レーザ衝撃ピーニング」は、レーザビーム発生源からのレーザビームを用いて表面の一部分に強い局部圧縮力を生み出すものである。かかる目的は、塗装又は被覆された表面あるいは被覆されない表面の瞬間的なアブレーション又は蒸発により爆発力を生み出すことによって達成される。レーザピーニングは、加工物の外面に圧縮応力を有する保護層を生み出すために使用されてきた。これは、「レーザピーニング装置及び方法」と称する米国特許第4937421号明細書中に開示されているごとく、疲労破損に対する加工物の抵抗性をかなり高めることが知られている。これらの方法においては、操作によって生じた衝撃波を閉込めると共にそれをLSPで処理すべき部品の材料本体中に転向させて有益な残留圧縮応力を生み出す閉込め媒質を得るため、加工物上に流された水のカーテンを使用するか、あるいはその他何らかの方法を使用するのが通例である。

【0003】レーザ衝撃ピーニングは、ガスタービンエンジン分野における数多くの用途のために開発されている。かかる用途の一部は、「オンザフライレーザ衝撃ピーニング」と称する米国特許第5756965号、「レーザ衝撃ピーニングを施したガスタービンエンジン用送風機羽根縁端」と称する同第5591009号、「亀裂

を防止又は転向する技術」と称する同第5569018号、「レーザ衝撃ピーニングを施したガスタービンエンジン用圧縮機羽根縁端に関するゆがみ管理」と称する同第5531570号、「レーザ衝撃ピーニングを施したターボ機械用ロータ部品」と称する同第5492447号、「接着テープで被覆されたレーザ衝撃ピーニング」と称する同第5674329号、及び「乾燥テープで被覆されたレーザ衝撃ピーニング」と称する同第5674328号の明細書中に開示されている。なお、これらの発明はいずれも本発明の譲受人に譲渡されたものである。上記及びその他の用途においては、レーザ衝撃ピーニングを用いた生産操業に際して効率的な品質保証試験が必要となる。

【0004】LSPは材料の深部処理であるから、体積に係わるLSP効果を表わす品質保証試験が得られれば望ましい。また、実質的に相等しい残留圧縮応力を加工物の両側に（すなわち、ガスタービンエンジン用送風機羽根の前縁に沿って）付与する両面LSP操作又は同時両面LSP操作に適合した品質保証（QA）方法を得ることも望ましい。

【0005】以前に使用されていたレーザ衝撃ピーニング品質保証技術の一例は、LSPで処理されかつ試験前にLSP処理区域にノッチを付けた前縁を有する羽根の高サイクル疲労（HCF）試験である。この方法は試験片を破壊するものであり、実施のためにかなりの費用及び時間を消費し、かつ生産及びLSP処理部品の合否判定操作を著しく遅らせる。LSPの測定及び管理を行うための改良された品質保証方法としては、費用が安く、正確で、かつ迅速な非破壊評価（NDE）方法が極めて望ましい。また、費用が比較的安く済むばかりでなく、加工物の試料採取を行う代りに各々の加工物に関して使用するのに十分な程度の経済性を有するようなNDE品質保証方法を得ることも望ましい。LSPは、いかなる生産技術と共に使用する場合であれ、機械設備を必要とする上、多くの時間及び費用を消費する操作である。それ故、生産設備の量又は複雑度及び（又は）生産時間を低減させ得るような技術が得られれば極めて望ましいわけである。

【0006】「レーザ衝撃ピーニングによって生じたくぼみの体積分析によるレーザ衝撃ピーニングの品質保証」と称する米国特許第5948293号明細書中には、レーザ衝撃ピーニング操作における1回のレーザ投射によって生み出された1個のレーザ衝撃ピーニング処理試験用くぼみの体積測定データを得るための干渉輪郭測定方法及び装置が開示されている。また、「レイリー波の臨界角の測定」と称する米国特許第5987991号、「多重超音波変換器式回転走査装置及びその使用方法」と称する同第5974889号、及び「平面内たわみ試験クーポンを用いてレーザ衝撃ピーニングを監視しかつ管理する方法」と称する同第5951790号の

明細書中には、その他のQA方法が開示されている。

【0007】

【発明の概要】生産用加工物のレーザ衝撃ピーニング操作の品質管理試験のための方法が開示される。かかる方法は、(a)レーザ衝撃ピーニング操作によって付与された深部残留圧縮応力を有する領域がレーザ衝撃ピーニング処理表面から加工物の内部にまで延びているような加工物上のレーザ衝撃ピーニング処理表面の少なくとも一部分を超音波で走査する工程と、(b)走査から得られた信号を計数化し、そして走査から得られた強度値の計数化画像を形成する工程と、(c)強度値に基づいて加工物の計数化画像の複数の点に関する少なくとも1つの統計関数値を計算する工程と、(d)かかる統計関数値を、レーザ衝撃ピーニング操作の品質保証あるいは加工物の合格又は不合格に関する合否判定基準と比較する工程とを含んでいる。

【0008】本発明の実施の一態様においては、計数化画像の複数の点が、レーザ衝撃ピーニング処理表面の一部分の内部にあるレーザ衝撃ピーニング処理くぼみに対応した1群の円によって区画される。上記の統計関数は、4つの式により定義された計数化画像の4つの統計的性質の少なくとも1つから成る。それら4つの式とは、 k 番目のくぼみに関する平均行列 $MM(k)$ 、くぼみ標準偏差行列 $SDM(k)$ 、1群の円内の全ての点に関する平均ベクトル $MV(x)$ （ここに、 x は各々のくぼみ内における画素の数である）、及び1群の円のそれぞれに関する標準偏差ベクトル $SDV(x)$ である。3つのタイプの統計関数として、くぼみ平均行列の平均 $F1$ 、標準偏差行列の平均 $F2$ 、及び標準偏差ベクトルの平均 $F3$ が挙げられる。

【0009】別の実施の態様においては、計数化画像の複数の点がレーザ衝撃ピーニング処理表面の一部分の内部にあるレーザ衝撃ピーニング処理くぼみを包囲する長方形によって区画されると共に、統計関数はソーベル演算子を含むソーベル関数 $F4$ である。

【0010】上記の合否判定基準は、試験片の統計関数データと、同一又は同様なレーザ衝撃ピーニング装置においてレーザ衝撃ピーニングを施された試験片の高サイクル疲労試験に基づく高サイクル疲労破損データとの間において予め決定された相関関係に基づいている。かかる試験片の各々は、同一又は同様なレーザ衝撃ピーニング装置においてレーザ衝撃ピーニングを施された試験片のレーザ衝撃ピーニング処理区域内に破損を促進する傷を有している。

【0011】本発明の上記及びその他の特徴は、添付の図面を参照しながら以下の説明を考察することによって一層良く理解されよう。

【0012】

【好適な実施の態様の詳細な説明】品質保証は、通例、合否判定型（すなわち、合格—不合格判定型）の分析で

ある。本発明の方法及び技術は、生産用加工物（たとえば、図1、2及び3に示された典型的な航空機用ターボファン式ガスタービンエンジンの生産用送風機羽根108）に対するレーザ衝撃ピーニング操作の品質保証を行うものである。図1には、レーザ衝撃ピーニング操作の品質管理のための品質保証方法を実施するために使用される超音波走査システム10が略示されている。本発明の方法及び技術は、生産用加工物（たとえば、米国特許第5492447、5674329、5674328及び5591009号明細書に開示されているもの）のとき、典型的な航空機用ターボファン式ガスタービンエンジンの送風機羽根108又はその他の金属材料製物体）に対するレーザ衝撃ピーニング操作の品質保証を行うものである。本発明の方法は、各々の加工物のレーザ衝撃ピーニングの途中又は終了後、あるいは加工物バッチのレーザ衝撃ピーニングの終了後又は開始前に実施される試験である。生産作業中には、超音波強度データに関する1つ以上の関数が、所定の合否判定基準（たとえば、加工物の合否を判定するための高サイクル疲労相関データ）と比較される。

【0013】図2及び図3について説明すれば、生産用送風機羽根108は、羽根のプラットホーム136から羽根先端138まで半径方向に沿って外方に延びるエーロフォイル134と、プラットホーム136から半径方向に沿って内方に延びる基底部140とを含んでいる。基底部140は、羽根のシャंक144によって羽根のプラットホーム136に連結された羽根の根元142を有している。エーロフォイル134は、翼弦方向において前縁LEと後縁TEとの間に延びている。送風機羽根108の前縁区域150は、エーロフォイル134の前縁LEに沿って羽根のプラットホーム136から羽根先端138まで延びている。エーロフォイル134は、その前縁LEと後縁TEとの間に延びる圧力側壁146及び吸引側壁148を有している。前縁区域150は、エンジンの運転に際しエーロフォイル134の前縁に沿って切れ目や裂け目の起こり得る区域を含むように予め決定された第1の幅 W を有している。エーロフォイル134は、エンジンの運転時に回転する送風機羽根108によって発生される遠心力のために顕著な引張応力場に暴露される。エーロフォイル134はまた、エンジンの運転時に発生する振動にも暴露される。その結果、切れ目や裂け目は高サイクル疲労応力発生部位として作用し、そしてそれらの周囲に追加の応力集中を生み出す。

【0014】切れ目や裂け目から発生して延びることのある亀裂線に沿って羽根の一部分が疲労破損を起こすのを防止するため、初期の切れ目や裂け目が高サイクル疲労のために羽根の破損を引起す可能性のある前縁LEの一部分に沿ってレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145が配置されている。レーザ衝撃ピーニング処理パッチ145の内部には、圧力側壁146及び吸引側壁148

の少なくとも一方（又は図示のごとくに両方）に対して同時にレーザ衝撃ピーニングを施す。このことにより、図2に示されるごとく、圧力側壁側及び吸引側壁側のレーザ衝撃ピーニング処理表面153及び154が形成されると共に、レーザ衝撃ピーニング（LSP）によって付与された深部残留圧縮応力を有しかつレーザ衝撃ピーニング処理表面からエロフォイル134中に延びる圧力側壁側及び吸引側壁側のプレストレスト領域155及び156がそれらに対応して形成される。かかるプレストレスト領域155及び156は前縁区域150の一部分のみに沿って図示されているが、所望ならば前縁LEの全体又はより長い部分に沿って延びていてもよい。

【0015】かかる実施の態様に係る所定の判定基準は、超音波強度データに関する1つ以上の関数と、図1に示されたレーザ衝撃ピーニング済みかつノッチ付きの試験用送風機羽根109によって例示されるような試験用加工物の高サイクル疲労データとの相関関係に基づいている。なお、生産用及び試験用の送風機羽根108及び109には、それぞれ生産操業及び相関関係決定用のHCF試験作業に際して同じやり方でレーザ衝撃ピーニングが施される。

【0016】図1には、レーザ衝撃ピーニング操作の品質管理のための品質保証方法を実施するために使用される超音波走査システム10が略示されている。かかるシステム10は、図2に一層詳しく示されるレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145を有する生産用送風機羽根108によって例示される生産用及び試験用の加工物に関して使用される。かかる方法に従えば、パッチ145の少なくとも一部分が超音波で走査され、超音波信号が測定され、超音波信号を計数化した後に計数化超音波強度データが記録され、超音波強度信号から得られた計数化超音波強度データに関する少なくとも1つの統計関数が計算され、そしてかかる統計関数を同じタイプの統計関数に関する高サイクル疲労相関データと比較することによってレーザ衝撃ピーニング操作又はレーザ衝撃ピーニング処理製品が合格か否かが判定される。

【0017】図1に示された本発明の実施の一態様は超音波走査を使用するものであって、超音波走査システム10はレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145の範囲内の送風機羽根108を通過して超音波受信変換器32に到達するように超音波ビーム28を放射するための超音波送信変換器30を含んでいる。送風機羽根108はキャリア70上に取付けられ、そしてレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145を含む羽根の一部分は水のごとき超音波媒体40中に沈められている。キャリア70は、超音波送信変換器30からの超音波ビーム28がレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145を通過して超音波受信変換器32に到達するように送風機羽根108を移動させるために役立つ。その間、コンピュータ42又はその他の記録装置により、受信変換器からの電子

信号がパッチに対するレーザ衝撃ピーニングの作用によって生じたくぼみにおける材料密度及び該くぼみの形態の関数として記録される。キャリア70は、固定された超音波ビーム28、超音波送信変換器30及び超音波受信変換器32に対して送風機羽根108の位置決めを行うため、図示のごとくX、Y及びZ方向に送風機羽根108を並進させると共にA及びB軸の回りに送風機羽根を回転させるための多軸運動手段を有している。キャリア70の運動は、ユーザによって操作されるキーボード76を使用しながら制御装置74によって制御することができる。

【0018】記録された電子信号は超音波強度像44に変換される。この超音波強度像44はコンピュータ42中に保存され、そして図4に示されるごとくコンピュータ42の画面48上に表示することができる。一般的に述べれば、本発明は様々な種類の放射物を使用することができる。かかる放射物はコンピュータを用いて処理され、そして計算機処理された数値配列として記録されるか、あるいは図4に示されるような複数の画素46として計数化超音波強度像44中に記録される。これらの記録は、次いで統計関数を用いて分析される。

【0019】本明細書中に例示される実施の態様においては、超音波ビーム20によるパッチ145の走査に基づいて記録された強度データから得られた画素データが使用される。図4には、図1及び2におけるレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145の走査から得られた画素形式の超音波強度データを表わすデジタル画像が示されている。本発明の統計分析の一具体例において使用される画素データを区画するため、複数の画素46の一部分を包囲する8つの仮想円80が選択されている。各々の仮想円80は、レーザ衝撃ピーニングを施された円形くぼみ158の1つに対応している。くぼみが円形でない場合には、仮想円に代るものとして他の仮想形状を使用することもできる。ほぼ8種類までの仮想形状又は円を使用することができる。

【0020】図5は、図4からの強度データを分析すると共に、図4に示された強度データから統計関数を計算するために使用される仮想円80内の点114の配列112を示すものである。強度データから計算された統計関数の結果を同じタイプの統計関数に関する高サイクル疲労相関データと比較することにより、レーザ衝撃ピーニング操作又はレーザ衝撃ピーニング処理製品が合格か否かが判定される。

【0021】本明細書中に例示された統計関数は、計数化された超音波強度像44の4つの統計的性質を使用するものである。これらの統計的性質は図8中の式によって定義される。それらの統計的性質とは、（羽根1本につき $K=8$ 個のくぼみについて示された） k 番目のくぼみに関する平均行列 $MM(k)$ 、くぼみ標準偏差行列 $SDM(k)$ 、各々のくぼみ内の x 番目の画素に関する平均

10

20

30

40

50

ベクトル $MV(x)$ 〔ここに、 x は各々のくぼみ内における点又は画素の総数（図示の場合は377個）である〕、及び標準偏差ベクトル $SDV(x)$ である。

【0022】図9中の式は、本発明の分析において使用するのに適した4つの選択可能な統計関数（ $F1 \sim F4$ ）を定義するものである。かかる統計関数（ $F1 \sim F4$ ）の各々は、それぞれの加工物又は羽根について計算される。第1の統計関数はくぼみ平均行列の平均 $F1$ であって、これは（最大で全てのくぼみを含む）1行以上のくぼみを用いて計算される。本明細書中に例示された実施の態様においては、1行当り4個のくぼみ及び羽根1本当り2行のくぼみを使用される。この場合、羽根1本当り8個のくぼみ及び各々のくぼみ内に377個の画素点が存在する。従って、この関数は $k=1 \sim 8$ 及び $x=1 \sim 377$ にわたって合計される。測定される変数は $dk(x)$ であるが、これは k 番目のくぼみ内の画素強度である。まず、各々のくぼみ (x) に関する377個の画素強度値 $dk(x)$ が合計され、そして得られた8つのくぼみ和を合計することによって総和が得られる。次いで、くぼみ (x) の数である K で総和を割ることにより、各々の羽根についてくぼみ平均行列の平均 $F1$ が計算される。

【0023】第2の統計関数は標準偏差行列の平均 $F2$ であって、これは（最大で全てのくぼみを含む）1行以上のくぼみを用いて計算される。本明細書中に例示された実施の態様においては、1行当り4個のくぼみ及び羽根1本当り2行のくぼみを使用される。この場合にも、1行当り4個のくぼみ及び羽根1本当り2行のくぼみが使用され、そして各々のくぼみは377個の画素点を有している。 K 個のくぼみのそれぞれについて、377個の画素に関する標準偏差（ SD ）が計算される。次いで、 K 個の SD を合計した後、その和をくぼみの総数 K で割ればよい。

【0024】第3の統計関数は標準偏差ベクトルの平均 $F3$ であって、これは（最大で全てのくぼみを含む）1行以上のくぼみを用いて計算される。本明細書中に例示された実施の態様においては、1行当り4個のくぼみ及び羽根1本当り2行のくぼみを使用される。1行当り4個のくぼみ及び羽根1本当り2行のくぼみが存在するものとすれば、8個のくぼみが存在することになる。各々のくぼみは377個の画素点を有している。まず、377個の画素のそれぞれについて、8個のくぼみに関する標準偏差ベクトル（ SDV ）が計算される。次いで、377個の SDV を合計した後、その和を点の総数である377で割ればよい。

【0025】図6には、図1及び2におけるレーザー衝撃ピーニング処理パッチ145の走査から得られた画素形式の超音波強度データを表わすデジタル画像が示され、そして複数の画素（及び仮想円80）の一部分が仮想長方形84によって区画されている。かかる仮想長

形84は、図9に示された第4の統計関数（ソーベル関数 $F4$ ）と共に使用される画素データを区画するために使用されている。本明細書中に例示された実施の態様において使用される仮想長方形84は、1行当り3個のくぼみ及び羽根1本当り3行のくぼみを包囲している。ソーベル関数 $F4$ の式において、 i 及び j は図7中の長方形84の内部における x 及び y 方向の点を表わす。図7に例示された長方形の面積は2インチ（50.8mm） \times 1/2インチ（12.7mm）である。長方形84は、 x 方向において2インチの長さを有し、かつ y 方向において1/2インチの長さを有する。長方形内の画素強度は 250×50 個の点に分解されるから、 $i=1 \sim 250$ かつ $j=1 \sim 50$ である。

【0026】関数 du,v は各々の点 i, j に関する9個の点 u, v における画素値であり、また関数 wu,v は図10に示されるような u, v におけるソーベル演算子である。本明細書中に例示された実施の態様においては、 3×3 のソーベル演算子 W が使用される。変数 u, v は配列中の位置を表わすが、それらは画像中の画素配列中における点 i, j 及び8個の周囲点を含んでいる。従って、 $u=1 \sim 3$ かつ $v=1 \sim 3$ である。 $F4$ を取扱いの容易な小さい数にするため、スケーリング因子 N （この実施の態様においては10000）が使用される。ソーベル演算子は、画素強度データを用いたエッジ検出及び画像強調技術において使用されることが公知である。ここで使用されるソーベル演算子は、 3×3 の非線形エッジ強調用のものである。

【0027】図10に示されるごとく、ソーベル演算子 W は 3×3 の演算子配列を成している。これは、番号51によって表わされる配列中の中心の数である特定の画素強度 D にはゼロを掛ける。それはまた、図10に示されるごとく、左から右への時計回りの方向に沿って全ての周囲の画素にそれぞれ $-1, -2, -1, 0, 1, 2, 1$ 及び 0 を掛ける。掛算によって得られた値の全てを合計すれば、対象とする特定の画素強度に対する新しい置換値が得られる。上から下に向かって空間的不連続性が存在しなければ、問題の画素よりも上方の画素には、問題の画素よりも下方の乗数と同等な負の数が掛けられることになる。それ故、画素数が相対的に同じであれば、その和はゼロに近くなるわけである。

【0028】本明細書中に例示された試験用送風機羽根109に関する高サイクル疲労（HCF）相関データは、図11に示されるごとくレーザ衝撃ピーニングを施されかつノッチを付けられた試験用送風機羽根109（すなわち、破損を促進するためのノッチを付けた実物大のもの）の疲労試験結果に基づいている。試験片又は試験用送風機羽根109は実際の生産用送風機羽根108と同様にして製造されたものであるが、試験用送風機羽根109にはレーザ衝撃ピーニングを施してパッチ145を形成した後ノッチ152が付加されている。

【0029】レーザ衝撃ピーニングを施された試験用送風機羽根109が超音波で走査され、そして計数化された超音波強度データが統計分析のために保存される。走査から得られた計数化超音波強度データの統計分析の結果と比較する目的で生産操業に際して使用するための合否判定基準を作成するためには、HCF試験を使用することができる。その場合には、計数化超音波強度データが記録され、そして相関関係決定目的のために分析される。すなわち、レーザ衝撃ピーニングを施された試験用送風機羽根109が第1モードの振動数で破損するまで振動させられる。相関関係を決定するためには、複数又はただ1個の試験用送風機羽根109にノッチを付け、そして高サイクル疲労試験を施せばよい。高サイクル疲労を引起くため、レーザ衝撃ピーニングを施された各々の試験用送風機羽根109のレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145には(破損を促進する傷を表わす)ノッチ152が設けられる。かかるノッチ152は、羽根にレーザ衝撃ピーニングを施した後、プレストレスト領域155及び156の所定位置に設けられる。かかるノッチ152は、所定のモード線(たとえば、第1モード線LM)を中心として配置することができる。試験用羽根が羽根から出る強制関数の時間及び振幅に関して標準又は試験基準に適合すれば、それは合格である。次に、これらの結果を生産操業に際して使用することにより、レーザ衝撃ピーニング操作の合否を試験することができる。なお、生産用レーザ衝撃ピーニングに関するパラメータが変化しない限り、生産操業全体に対して1回の較正を行えばよいものと考えられる。

【0030】図12には、送風機羽根108にレーザ衝撃ピーニングを施すためのレーザ衝撃ピーニング装置101が示されている。送風機羽根108は、コンピュータによって数値制御(CNC)された5軸のマニプレータ127に固定された取付具15に取付けられている。この実施の態様において示された5つの運動軸とは、CNC加工分野において公知である通常の並進軸X、Y及びZ並びに通常の回転軸A及びCである。マニプレータ127は、生産用及び試験用送風機羽根108及び109の移動及び位置決めを行い、それにより「オン・ザ・フライ」の状態でレーザ衝撃ピーニングを施すために役立つ。レーザ衝撃ピーニングは、アブレーティブ媒質としてペイント又はテープを使用しながら様々なやり方で実施することができる(「粘着テープ被覆レーザ衝撃ピーニング」と称する米国特許第5674329号明細書を参照されたい)。なお、(試験片及び加工物をそれぞれ表わす)生産用送風機羽根108及び試験用送風機羽根109の前縁区域150にレーザ衝撃ピーニング操作を施す際には、同じレーザ衝撃ピーニング装置101が使用される。

【0031】レーザ衝撃ピーニングを施されてレーザ衝撃ピーニング処理パッチ145を形成するための区域に

おいては、米国特許第5674329及び5674328号明細書中に開示されているごとく、圧力側壁側及び吸引側壁側のレーザ衝撃ピーニング処理表面153及び154はペイント又は粘着テープのごときアブレーティブ被膜で被覆され、それによって被覆表面を形成している。かかる被膜はアブレーティブ媒質を提供し、そしてその上には流水カーテン121のごとき透明な流体カーテンから通例成る透明な閉込め媒質が配置される。

【0032】レーザビームの衝撃によって誘起される深部残留圧縮応力は、2つの高出力レーザビーム102を繰返して投射することによって生み出すことができる。それらのレーザビームの各々は、生産用送風機羽根108の圧力側壁146及び吸引側壁148における圧力側壁側及び吸引側壁側の被覆されたレーザ衝撃ピーニング処理表面153及び154に対して±数ミルだけ焦点がぼかされている。各々のレーザビームは、通常の給水管120の末端に設けられた通常の水ノズル123によって供給される流水カーテン121を通して投射される。流水カーテン121は被覆表面上に流される。被膜がアブレーションを受けてプラズマを生成すると、それは材料の表面に衝撃波を及ぼす。ペイントに対する適当な代用物として、その他のアブレーティブ材料を用いて表面を被覆することもできる。このような被膜材料としては、米国特許第5674329及び5674328号明細書中に開示されているような金属箔及び粘着プラスチックテープが挙げられる。かかる衝撃波は流水カーテン121によって被覆表面に向けて転向させられ、そして被覆表面下方の材料中に進行衝撃波(圧力波)を生じる。かかる衝撃波の振幅及び量により、圧縮応力の深さ及び強度が決定される。このようなアブレーティブ被膜は、標的表面を保護すると共に、プラズマを発生させるために使用される。圧縮応力によるプレストレスト領域においてレーザビームの衝撃によって誘起された深部残留圧縮応力は一般に約50~150KPSI(キロポンド/平方インチ)であって、これはレーザ衝撃ピーニング処理表面からプレストレスト領域中に約20~50ミルの深さまで延びている。

【0033】生産用送風機羽根108が連続的に移動している間に、静止した高出力レーザビーム102が圧力側壁側及び吸引側壁側の被覆されたレーザ衝撃ピーニング処理表面153及び154上の流水カーテン121を通して連続的に投射され、それによって互いに離隔したレーザ衝撃ピーニング処理円形スポット又はくぼみ158が形成される。生産用送風機羽根108には、生産操業に際し、相関関係決定のためのHCF試験作業の際と同じやり方でレーザ衝撃ピーニングが施される。制御装置124は、レーザ衝撃ピーニング装置101を調整しかつ制御することにより、被覆表面にレーザビーム102を管理下で投射するために使用される。なお、アブレーティブ被膜材料は流水カーテン121によって洗い流

される。

【0034】本明細書中に例示された本発明方法の具体例においては、羽根を連続的に移動させながらテープ表面に対してレーザビームが連続的に投射される。それにより、互いに隣接したレーザ衝撃ピーニング処理円形スポットに様々な順序でレーザビームを投射することができる。とは言え、ビームと表面との間において相対運動が行われた場合にのみ、レーザビームを投射することもできる。

【0035】以上、本発明の好適な実施の態様を説明したが、上記の記載に基づけば本発明のその他の変更態様は当業者にとって自明であろう。それ故、前記特許請求の範囲は本発明の真の精神及び範囲に含まれる全てのかかる変更態様を包括することが意図されている。従って、アメリカ合衆国の特許証によって確保したいと望むものは、前記特許請求の範囲によって規定されかつ弁別された発明である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の一態様に係る方法に従い、送風機羽根のレーザ衝撃ピーニング処理パッチの一部分を超音波で走査して超音波強度像を生み出すための超音波走査システムの構成を示す略図である。

【図2】本発明の実施の一態様において使用されるレーザ衝撃ピーニング済みの生産用加工物の実例を成す生産用送風機羽根の斜視図である。

【図3】図2中の線3-3に関する送風機羽根の断面図である。

【図4】図2のレーザ衝撃ピーニング処理パッチの走査から得られた超音波強度データ及び本発明の実施の態様の一部において使用されるデータを区画する仮想円を示すコンピュータ画面の図である。

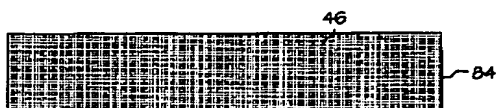
【図5】一部の統計関数を計算するために使用される、図4中の強度データの仮想円の1つに含まれる点を示す図である。

【図6】ソーベル演算子統計関数と共に使用される超音波強度データの集合を仮想長方形で包囲した、図4のコンピュータ画面の図である。

【図7】ソーベル演算子統計関数と共に使用される図6中の強度データの仮想長方形に含まれる点を示す図である。

【図8】図4中の点の強度データを分析するために使用される4つの統計的性質を示す図である。

【図7】



【図9】図4及び6中の点の強度データを分析するために使用される4つの典型的な統計関数を示す図である。

【図10】図9中のソーベル統計関数F4において使用されるソーベル演算子を示す図である。

【図11】高サイクル疲労破損データと典型的な統計関数との間の相関関係を決定するために使用される試験片の実例を成す試験用送風機羽根の斜視図である。

【図12】レーザ衝撃ピーニング装置に取付けられた図1及び2の羽根の概略斜視図である。

【符号の説明】

10 超音波走査システム

28 超音波ビーム

30 超音波送信用変換器

32 超音波受信用変換器

40 超音波媒体

42 コンピュータ

44 計数化画像

46 画素

48 画面

70 キャリヤ

74 制御装置

76 キーボード

80 円

84 長方形

101 レーザ衝撃ピーニング装置

102 レーザビーム

108 生産用加工物又は送風機羽根

109 試験用加工物又は送風機羽根

112 配列

114 点

121 流水カーテン

123 水ノズル

127 マニプレータ

134 エアロフォイル

145 パッチ

146 圧力側壁

148 吸引側壁

152 ノッチ

153 圧力側壁側のレーザ衝撃ピーニング処理表面

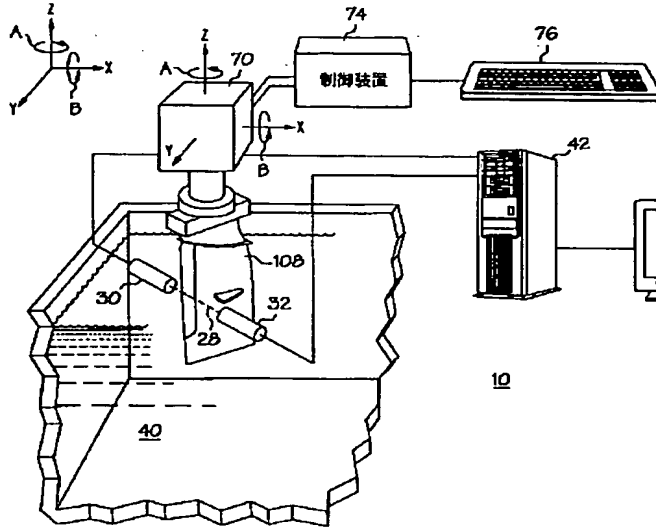
154 吸引側壁側のレーザ衝撃ピーニング処理表面

158 レーザ衝撃ピーニング処理くぼみ

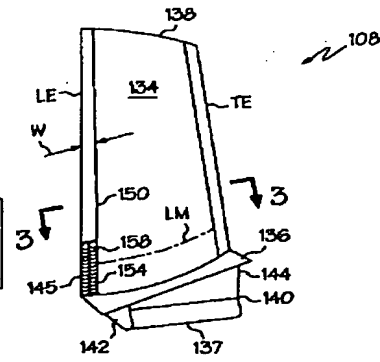
【図10】

$$W_{u,v} = \begin{vmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & w_{1,3} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & w_{2,3} \\ w_{3,1} & w_{3,2} & w_{3,3} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

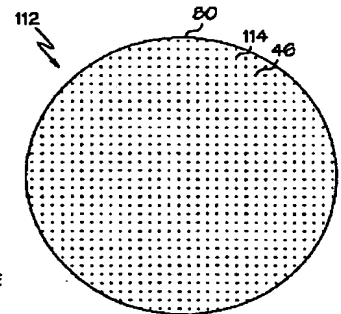
【図1】



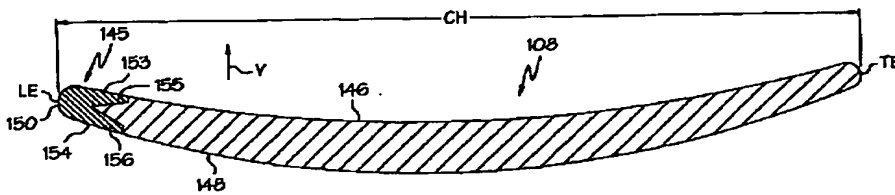
【図2】



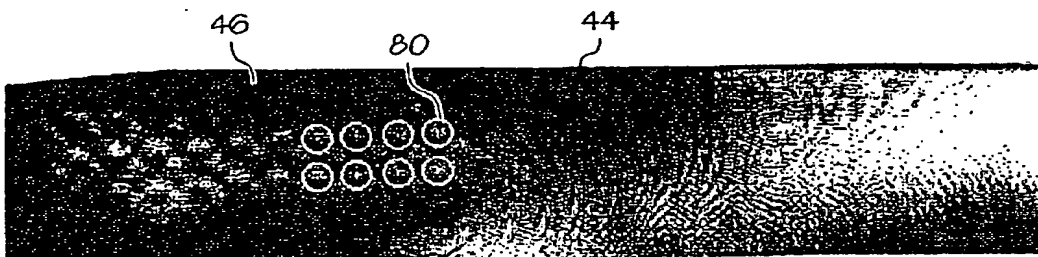
【図5】



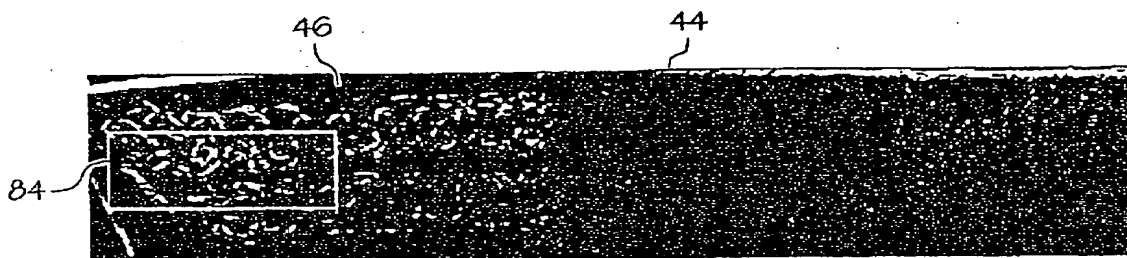
【図3】



【図4】



【図6】



【図8】

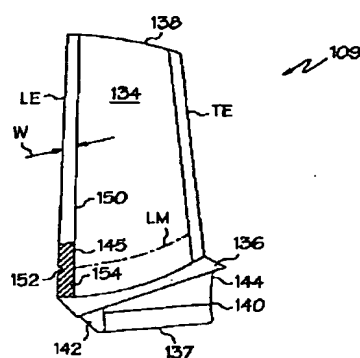
$$MM(k) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X d_k(x)$$

$$SDM(k) = \sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2}$$

$$MV(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_k(x)$$

$$SDV(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}}$$

【図11】



【図9】

$$F1 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K MM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X d_k(x) \right]$$

$$F2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K SDM(k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\sqrt{\frac{1}{X} \sum_{x=1}^X (d_k(x) - MM(k))^2} \right]$$

$$F3 = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X SDV(x) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X \left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (d_k(x) - MV(x))^2}{K}} \right]$$

$$F4 = \frac{\sum_i \sum_j (d_{u,v} * w_{u,v})}{N}$$

【図 12】

